

# 소프트 스위칭 Single Stage AC-DC Full Bridge Boost 컨버터

김 은 수\*, 조 기 연\*, 김 윤 호\*\*, 조 용 현\*\*, 박 경 수\*\*,  
 안 호 균°, 박 순 구°  
 한국전기연구소\*, 중앙대학교\*\*, 창원대학교°

## Soft Switching Single Stage AC-DC Full Bridge Boost Converter

E. S. Kim\*, K. Y. Joe\*, Y. H. Kim\*\*, Y. H. Cho\*\*, G. S. Park\*\*,  
 H. G. An°, S. G. Park°  
 K.E.R.I.\*, Chung-Ang Univ.\*\*, Chang-Won Univ.°

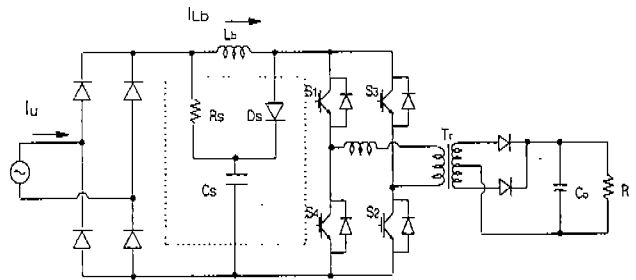
### Abstract

A new soft switching single stage AC-DC full bridge boost converter with unit input power factor and isolated output is presented in this paper. Due to the use of a non-dissipative snubber on the primary side, a single stage high-power factor isolated full bridge boost converter has a significant reduction of switching losses in the main switching devices. The non-dissipative snubber adopted in this study consists of a snubber capacitor  $C_r$ , a snubber inductor  $L_r$ , a fast recovery snubber diode  $D_r$ , and a commutation diode  $D_p$ . This paper presents the complete operating principles, theoretical analysis and experimental results.

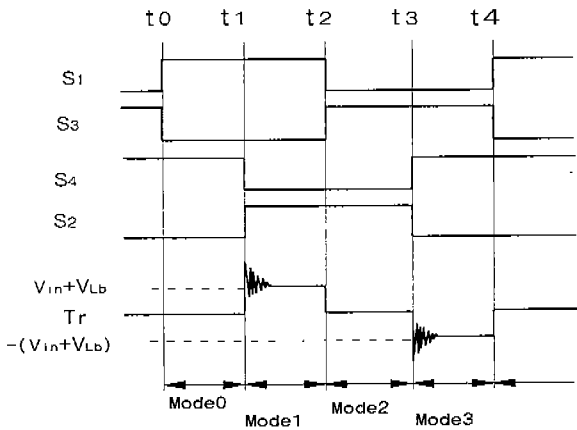
### 1. 기존의 Single Stage AC-DC Full-Bridge Boost Converter

그림1(a)에 나타낸바와 같이 입력 역률을 개선시키고, 저가의 절연된 Single Stage 승압형 AC-DC 컨버터를 얻기 위해, 입력 승압인덕터  $L_b$  및 정류부, Full Bridge 고주파인버터, 고주파변압기, 고주파정류 회로로 구성된 Single Stage AC-DC Full Bridge Boost 컨버터가 제안되어 최근 적용되고 있다.[1, 6] 하지만, 주 회로에 있어서  $S_1$  과  $S_4$  또는  $S_2$  와  $S_3$ 을 Turn-on 후 스위칭소자 중 하나를 Turn-off 할 때 승압인덕터  $L_b$ 에 흐르던 전류가 고주파변압기 누설인덕턴스  $L_l$ 에 의해 바로 고주파변압기  $T_r$ 로 전류경로가

형성되지 못하고 입력 승압인덕터  $L_b$ 를 통해 흐르던 전류  $I_{Lb}$ 가 스위칭소자내의 기생 캐패시턴스와 기생진동(Ringing)현상을 일으키고 스위칭소자의 전압 스트레스를 증가시킨다.



(a) 기존 회로 구성



(b) 고주파변압기 및 제어회로 동작과형

그림 1. 종래의 Single Stage AC-DC full bridge boost converter

이를 해결하기 위해 스위칭소자  $S_1, S_2, S_3, S_4$ 의 DC Link 양단에 그림 1(a)의 점선부분과 같은 RCD 스너버회로를 부착시켜 스위칭소자의 Turn-off시 입력 승압인덕터  $L_b$ 에 흐르는 전류  $I_{Lb}$ 의 전류경로를 스너버 다이오드  $D_s$ 와 스너버커패시터  $C_s$ 를 통해 흐르게 하여 줌으로써, 스위칭소자에 인가되는 서지 전압을 Clamp 할 수 있다. 그러나, 이와 같은 RC 혹은 RCD 스너버회로의 적용은 방전 시 스너버커패시터  $C_s$ 에 충전된 에너지를 스너버저항  $R_s$ 을 통해 소비하게 되므로 스위칭주파수와 입력전압이 높을수록 스위칭손실이 커져서 에너지변환효율을 저감시킨다. 또한, 주 스위칭소자가 턴-오프 하는 시점에서 스위칭에 따른 서지(surge)전압은, 주 스위칭소자( $S_1, S_2$ )에 높은 전압스트레스를 인가하게 되어 주 스위칭소자( $S_1, S_2$ )의 수명을 단축시키며, 또한 IGBT 주 스위칭소자( $S_1, S_2$ )의 턴-오프 후에 잠시동안 흐르는 Tailing Current에 의해 스위칭 전력손실을 야기 시키게 된다.

## 2. 제안된 단일 출력단 AC-DC 풀브리지 컨버터

그림 2에 나타낸 바와 같이, 그림 1(a)의 풀 브리지 컨버터 주회로에서 1차측 DC Link단에 RCD 스너버 대신 1개의 스너버커패시터( $C_s$ ), 2개의 스너버다이오드( $D_p, D_r$ )와 1개의 스너버 인덕터( $L_r$ )로 구성된 무손실 스너버회로를 적용함으로써 승압모드에서 파워링 모드로의 전이 시 입력 승압인덕터  $L_b$ 에 흐르는 전류의 저 임피던스 경로를 제공하여 줌으로써 주 스위칭 소자는 영전압 스위칭이 가능하다. Left-leg에서 Right-leg으로 옮겨가는 스위칭동작은 5가지모드로 나뉘어 지며, Mode 0에서 스너버커패시터  $C_r$ 의 충전전압  $V_{cr}$ 은 최초  $-V_{Lb}$ 으로 충전되어 있다고 가정한다.

### Mode 0 ( $t_0-t_1$ )

$t_0$ 에서 스위칭소자  $S_1$ 이 Turn-on 되면 교류입력전원  $V_{ac}$ 로부터 정류다이오드  $\Rightarrow$  승압인덕터  $L_b \Rightarrow$  스위칭소자  $S_1, S_4$ 를 통해 단락회로를 형성하면서 승압인덕터  $L_b$ 에 에너지를 축적하고, 전류  $I_{Lb}$ 가 상승한다. 이때, 승압인덕터전류  $I_{Lb}$ 와 동시에 스위칭소자  $S_1, S_4$ 를 거쳐 스너버인덕터  $L_r$ , 스너버다이오드  $D_r$  경로로 흐르는 스너버커패시터  $C_r$ 의 방전전류  $I_{cr}$ 의 합전류가 주 스위칭소자  $S_1, S_4$ 를 통해 흐르기 시작한다. 또한, 고주파변압기  $T_r$ 의 누설인덕턴스에 축적되어 있던 에너지는 스위칭소자  $S_4$  및 스위칭소자  $S_2$ 의 보디 다이오드  $D_2$ 의 경로로 순환한다. 이 Mode동안 스너버커패시터  $C_r$ 의 충전전압  $V_{cr}$ 은  $-V_{Lb}$ 에서  $+V_{Lb}$ 까지 역충전되고, 방전전류  $I_{cr}$ 가 0가 되면 이 Mode는 끝난다.

### Mode 1 ( $t_1-t_2$ )

$t_1$ 에서 스너버커패시터  $C_r$ 의 공진전류  $I_{cr}$ 이 0가 되면 스위칭소자  $S_1$ 과  $S_4$ 에는 교류전원  $V_{ac}$ 와 승압인덕터  $L_b$ 로부터 공급되는 전류  $I_{Lb}$ 만이 흐르면서 승압인덕터  $L_b$ 에 에너지를 저장한다. 이 때도, Mode0에서와 같이 고주파변압기  $T_r$ 의 누설인덕턴스 에너지에 의한 순환전류는 스위칭소자  $S_4$  및 스위칭소자  $S_2$ 의 보디 다이오드  $D_2$ 의 경로를 통해 계속해서 흐른다. 이 Mode동안 고주파변압기  $T_r$  1차전선이 스위칭소자  $S_1$ 과  $S_4$ 를 통해 단락 되어 있으므로, 고주파변압기  $T_r$  1차전압이 0가되어 고주파변압기  $T_r$  2차측 출력부에 에너지가 전달되지 못하고, 고주파변압기  $T_r$  2차측 누설에너지만 출력 콘덴서  $C_o$ 를 통해 충전시키면서 Reset되고, 출력 콘덴서  $C_o$ 에 저장되어 있는 에너지가 부하  $R_o$ 로 방전한다.

### Mode 2 ( $t_2-t_3$ )

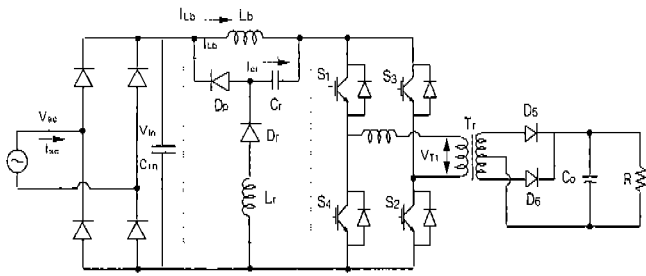
$t_2$ 에서  $S_4$ 를 Turn-off 하고, 동시에  $S_2$ 를 Turn-on 하면, 입력 승압인덕터  $L_b$ 에 저장되어 있던 에너지는 스위칭소자  $S_1 \Rightarrow$  고주파변압기  $T_r \Rightarrow$  스위칭소자  $S_2$ 의 High Impedance 경로보다는 스너버커패시터  $C_r$  및 전류(轉流)다이오드  $D_p$ 의 Low-Impedance의 경로를 통하여, 스너버 커패시터  $C_r$ 의 충전전압  $V_{cr}$ 이  $+V_{Lb}$ 에서 방전하기 시작한다. 이 때, 스위칭소자  $S_4, S_2$ 는 영전압(ZVS)상태에서 Turn-off 및 Turn-on 된다. 또, 스너버 커패시터  $C_r$ 의 전압이 방전하여 0로 저감되면, 입력전압  $V_{in}$ 과 입력 승압인덕터  $L_b$ 의 역전압  $V_{Lb}$ 의 합이 스위칭소자  $S_1$ 과 고주파변압기  $T_r, S_2$ 를 통해 서서히 인가되어 흐르기 시작하며, 고주파변압기  $T_r$  2차측에 에너지를 전달하게 된다. 이 때 출력 다이오드  $D_5, D_6$ 는 영전압, 영전류 상태에서 Turn-on되므로, 다이오드 역회복손실 및 전압 스트레스가 발생되지 않는다. 또한, 스너버커패시터  $C_r$ 의 충전전압이 0에서  $-V_{Lb}$ 으로 완전히 재충전되면 이 Mode는 끝난다. 이때, 스너버 커패시터  $C_r$ 의 방전전류  $I_{cr}$ 에 의해 교류전원  $V_{ac}$ 로 부터 공급되는 전류  $I_{ac}$ 가 불연속모드로 동작하는 단점을 제거하기 위해 정류다이오드 바로 후단에 적은 값의 입력 캐패시터  $C_{in}$ 를 적용하여 입력전류가 연속성이 있게 흐르도록 했다.

### Mode 3 ( $t_3-t_4$ )

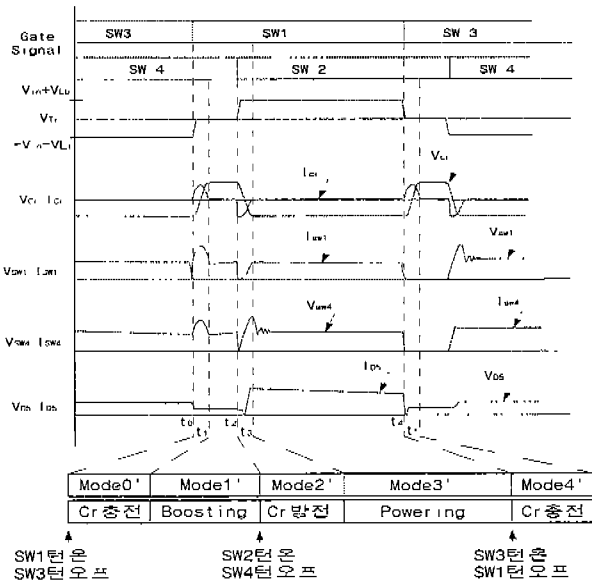
스너버커패시터  $C_r$ 의 방전전류  $I_{cr}$ 이 0가 되는  $t_3$ 에서 스너버커패시터 충전전압  $V_{cr}$ 은  $-V_{Lb}$ 으로 재충전되고, 입력전압  $V_{in}$ 과 승압인덕터  $L_b$ 에 유기된 전압  $V_{Lb}$ 의 합 전압( $V_{in}+V_{Lb}$ )이 고주파변압기  $T_r$ 에 인가되어, 고주파변압기 2차측과 출력콘덴서  $C_o$ 를 통해 평활 되어 부하에 에너지를 공급하게 된다.

### Mode 4 ( $t_4-t_5$ )

$t_4$ 에서 스위칭소자  $S_1$ 이 Turn-off 되고,  $S_3$ 가 동시에 Turn-on되면, Mode0에서와 같이 교류입력전원  $V_{ac}$ 로부터 정류다이오드, 승압인덕터  $L_b$ 와 스위칭소자  $S_3$ ,  $S_1$ 를 통해 단락회로를 형성하면서 승압인덕터  $L_b$ 에 에너지를 축적함과 동시에, 스위칭소자  $S_3$ ,  $S_2$ 를 거쳐 스너버인덕터  $L_r$ , 스너버다이오드  $D_r$ , 스너버캐패시터  $C_r$  경로로 방전전류  $I_{cr}$ 가 흐르고, 이 방전전류  $I_{cr}$ 에 의해 축적된 스너버인덕터  $L_r$ 의 에너지는 스너버캐패시터  $C_r$ 의 충전전압  $V_{cr}$ 을  $-V_{Lb}$ 에서  $+V_{Lb}$ 까지 역충전시키고, 방전전류  $I_{cr}$ 가 0가 되면 이 Mode는 끝난다.



(a) 무손실 스너버적용 주회로구성



(b) 각부 동작파형

그림 2. 무손실 스너버적용 Single Stage AC-DC full bridge boost converter

### 3. 고주파변압기 누설 인덕턴스에 따른 영향

일반 입력 역률 보상형 AC/DC 컨버터는 낮은 입력 AC전원 단에서 스위칭소자의 턴-온 시 입력 인덕터에 축적된 에너지를 주 스위칭소자 턴-오프 시 입력전원과 더불어 입력 인덕터에 축적된 에너지와

함께 출력다이오드를 매개로 바로 입력전압보다 더 높은 전압을 출력 캐패시터에 전달한다. 하지만, Single stage AC/DC 컨버터의 경우 고주파변압기를 매개로 출력을 전달함으로써 고주파변압기의 누설 인덕턴스에 따른 영향을 검토 할 필요성이 있다. 승압된 DC 출력 전력전압은 다음과 같다.

$$V_o = \frac{V_{in} (L_b + L_l D)}{[\frac{R_l}{R} L_b + L_b(1-D) + \frac{R_b}{(1-D)R} (L_b + L_l D)]} \dots\dots\dots (3)$$

여기서

$R_l$  (변압기내부저항):  $0.075\Omega$ ,  $L_l$  (변압기누설인덕턴스):  $6.8\mu H$

$R_b$  (인덕터내부저항):  $0.011\Omega$ ,  $L_b$  (인덕터인덕턴스):  $430\mu H$

그림 3은 변압기 누설 인덕턴스  $L_l$  ( $5\mu H \rightarrow 10\mu H \rightarrow 20\mu H$ )을 변화시켰을 때의 Duty Cycle  $D$ 의 변화에 따른 출력전압 특성으로 승압 인덕터  $L_b$  ( $430\mu H$ )의 값이 변압기 누설 인덕턴스  $L_l$ 에 비해 매우 크기 때문에 큰 영향을 주지 않는다. 다만 그림 3에서처럼 가상된 각 출력 저항  $R$  값에 있어서 (특히 경 부하시) Duty Cycle  $D$ 가 0.8 이상일 때 갑작스런 출력전압 상승 및 감소에 따라서 시스템의 불안전을 야기할 수 있기 때문에 실제적 적용에 있어서는 Duty Cycle  $D$ 를 0.8로 제한하여 사용했다.

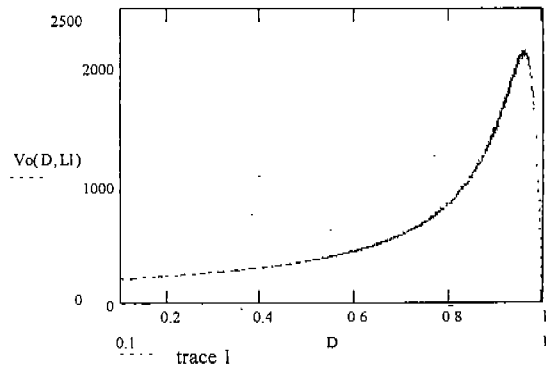


그림 3. 변압기 누설인덕턴스 ( $5\mu H \rightarrow 10\mu H \rightarrow 15\mu H$ )를 변화시켰을 때의 Duty Cycle  $D$  대 출력전압 특성

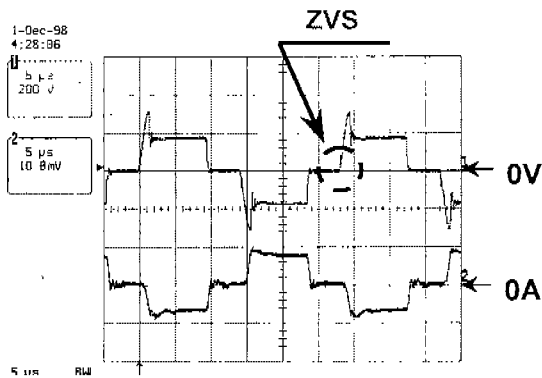
### 4. 실험 결과

본 논문에서 제안된 무손실 스너버 적용 Single Stage FB Boost Converter 동작 특성을 실험을 통해서 확인했다. 그림 4(a),(b),(c)는 입력전압 100VAC, 출력 230VDC, 1.4kW, 역률 0.993일 때의 실험결과 파형으로써 그림 4(a)의 1차측 고주파변압기 전압 및 전류 파형에서 일수 있는 바와 같이 1차 측 주 스위

칭소자(S<sub>1-4</sub>)는 무손실 스너버의 공진 동작특성에 따라 단락상태에서 Powering 모드로의 전이시 영전압에서부터 서서히 인가되는 영전압 스위칭동작특성을 갖는다. 그림 4(b)는 2차 측 고주파변압기 전압, 전류 파형으로서 1차측 스위칭소자가 단락된 동작 모드일 경우 1차 측 변압기는 Open된 상태이므로 2차 측 고주파변압기 누설인덕턴스와 출력다이오드의 기생 캐패시턴스와의 기생진동이 발생된다. 하지만 출력정류다이오드에 인가되는 전압은 출력전압V<sub>o</sub>으로 Clamp됨을 볼 수 있다. 따라서 출력전압에 노이즈 발생을 저감 할 수 있다. 그림 4(c)는 입력전원전압 및 전류, 전류스펙트럼 파형으로써 입력전류가 입력전압에 동상 제어함과 동시에 정현파형 제어됨을 볼 수 있다. 실험에 사용된 회로정수와 부품목록은 다음과 같다.

● 회로정수

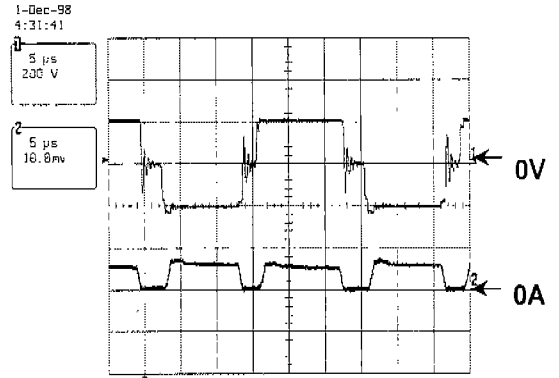
- 입력전압 : 100VAC,
- 출력전압, 전류 : 230VDC, 6A
- 스위칭 주파수 : 35kHz
- 주 스위칭소자 : IGBT(CT60AM-18F, 900V, 60A)
- 스너버 커패시터 Cr : 0.047uF
- 스너버 인덕터 Lr : 8.2uH ,
- 입력 승압인덕터 Lb : 430uH
- 변압기누설인덕턴스 : 6.8uH
- 출력 커패시터 Co : 1410uF



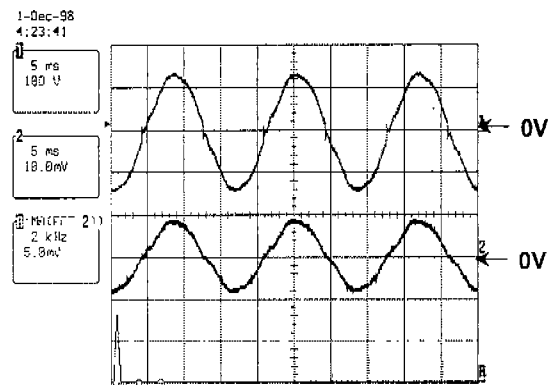
(a) 입력 전압, 전류 파형 (200V/div, 20A/div, 5us/div)

5. 결론

역률보정회로(PFC)를 갖는 절연된 Single Stage 무손실 스너버적용 소프트스위칭 컨버터의 모드별 동작 파형을 분석하고, 실험을 통해 검토해 봤다. 특히, lagging 스위칭소자S<sub>2</sub>, S<sub>4</sub>의 Turn-off시 영전압 상태와 2차측 다이오드에 영전류 상태에서 도통됨으로써 소자의 스위칭손실을 줄일 수 있음을 알았다.



(b) 제안된 Single Stage FB Boost Converter S1 및 Tr 전압, 전류파형 (200V/div, 20A/div, 5us/div)



(c) Single Stage FB Boost Converter 의 입력전압, 전류 파형 (100V/div, 20A/div, 5ms/div)

그림 4. 제안된 Single Stage FB Boost AC/DC Converter 실험 파형

[ 참고문헌 ]

- [1] T. Ninomiya, T. Tanaka, K. Harada, "Analysis and Optimization of a Non-dissipative LC Turn-Off Sunbber", IEEE PE, 1988.
- [2] Ray L. Lin, Fred C. Lee, "Novel Zero - Current - Switching - Zero - Voltage - Switching Converters", IEEE, APEC, 1996.
- [3] K Hirachi, J Yoshitsugu, M Nakaoka, "Single-Phase Switched-Mode PFC Rectifier with High-Frequency Link for Smal-Scale UPS Application", Vol 118, No. 7/8, 1998